

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND

Füüsika instituut

Paap Koemets

GERDIEN TÜÜPI IOONILOENDURI UURIMINE

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Sander Mirme, PhD

Tartu 2015

Sisukord

1	Kasutatud tähised.....	3
2	Sissejuhatus	4
3	Ülevaade	5
3.1	Aerosool	5
3.2	Aeroioonid.....	6
3.3	Ioniloendur	7
4	Gerdien ioniloendi	10
4.1	Tööpõhimõte	10
4.2	Elektriline sisendfilter	10
4.3	Analüsaator.....	11
4.4	Voolu mõõtmine.....	13
5	Mõõte-efektiivsuse hindamine.....	15
5.1	Sissejuhatus	15
5.2	Meetod.....	15
5.3	Tulemused	17
6	Signaalitöötlus	20
6.1	Sissejuhatus	20
6.2	Meetod.....	20
6.3	Tulemused	22
7	Kokkuvõte	23
8	Tänuavaldused	24
9	Kasutatud kirjandus	25
10	Study of Gerdien type ion counter.....	27
11	Lihtlitsents	28

1 Kasutatud tähised

C – mahtuvus

U - pinge

z – liikuvus

Φ – õhuvoolukiirus

ε_0 – dielektriline konstant

e_c – elementaarlaeng

l – vaba tee pikkus

η – viskoossus

r – iooni diameeter

2 Sissejuhatus

Aerosool on kahefaasiline dispersne süsteem, mis koosneb gaasilisest ehk dispersiooni-keskkonnast ja selles olevatest tahketest ja/või vedelatest osakestest ehk disperssest faasist. Aerosooliks saame lugeda meid ümbritsevat atmosfääri, sest viimane koosneb gaasi-keskkonnast koos selles hõljuvate tahkete ja vedelate osakestega. Aerosooliosakesed osalevad näiteks pilvepiiskade tekkes, neelavad ja hajutavad valgust, mistõttu mõjutavad atmosfääri soojusvahetust – lõppkokkuvõttes kliimat [1,2].

Aerosoolifüüsikas on tähtis osa laetud aerosooliosakestel ehk aeroioonidel. Tavalises õhus eksisteerib alati hulk klasterioone – kuni 1,6 nm läbimõõduga laetud osakesi. Koosmõjul lisandgaasidega on need osakesed võimelised kasvama suuremateks aerosooliosakesteks. Sellist aerosooliosakeste tekkimist nimetatakse nukleatsiooniks [2].

Aerosooliosakeste omadused ja mõju kliimale sõltuvad nende suurusest. Laetud aerosooliosakeste kontsentratsiooni mõõdetakse iooniloenduriga. Ioonide suurusjaotust hinnatakse liikuvusspektromeetrite abiga [2].

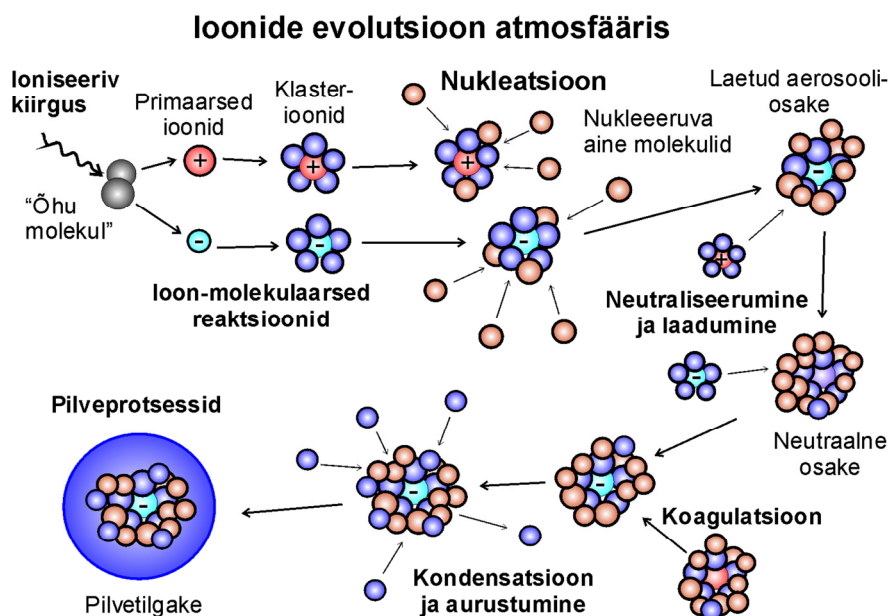
Käesoleva töö praktilises osas uuritakse uut Gerdien tüüpi iooniloendurit, mis on ehitatud AS Aireli poolt. Teoreetilises osas tutvustatakse lühidalt aersoole, aeroioone ja viimaste mõõtmismetoodikat. Praktilises osas hinnatakse iooniloenduri mõõteefektiivsust ja uuritakse digitaalse filtreerimise toimimist seadme signaalitöötluses.

3 Ülevaade

3.1 Aerosool

Aerosooliosakesed saab tekkemehhanismi alusel jaotada primaarseteks aerosoolideks, mis moodustuvad tahke või vedela aine pihustumisel dispersioonikeskkonda, ja sekundaarseteks aerosoolideks, mis tekivad nukleatsiooni käigus üleküllastunud gaaside kondenseerumisel ja gaasidevahelistes keemilistes reaktsioonides. Samuti saab aerosooli eristada ka loodusliku ja inimtekkelise päritolu alusel. Looduslikeks allikateks on näiteks vulkaanipursked, äikesest põhjustatud põlengud, veepritsmed veekogudest või bioloogilised protsessid. Inimtekkelised aerosoolid pärinevad enamasti fossiilsete kütuste põletamisest. Lisaks paiskab igasugune tööstuslik tegevus õhku tolmu, tekitades dispersiooniosakesi [1,2].

Sekundaarosakeste tekkimist lisandgaasidest nimetatakse nukleatsiooniks [3]. Tekkinud osakesed on algselt nanomeetri suurusel, kuid on võimelised tunduvalt kasvama ja tänu sellele osalema pilvede tekkes, muutma kiirgusbilanssi ja läbi selle mõjutama maa kliimat [4]. Nukleatsiooni toimumise oluliseks osaks on elektriliselt laetud aerosooliosakesed ehk aeroioonid (joonis 1). Sissehingamisel mõjutavad aerosooliosakesed ka inimest. Olenevalt kokkupuute vormist, võivad tekkida ka ägedad haiguse vormid [2].



Joonis 1. Skeem ioonindutseeritud nukleatsioonist kuni pilvetilga tekkimiseni [3].

3.2 Aeroioonid

Aeroiooniks nimetatakse õhus lenduvat laetud osakest. Umbes 50% aeroioonidest tekib radooni ja tema tütarelementide lagunemisel tekkiva radioaktiivse kiirguse toimetel, mille tõttu on aeroioonide teke tugevas korrelatsioonis radooni sisaldusega atmosfääris. Inimtekke poolelt aitab kaasa pinnase töötlemisega kaasnev radooni emissiooni muutus ning tuumaelektrijaamades ja jäätmekäitlustehastes vabanev radioaktiivne krüptoon-85. Looduslikult mõjutab aeroioonide teket kosmosest pärinev ioniseeriv kiirgus [5].

Aeroioone iseloomustatakse elektrilise liikuvusega z , mis näitab triivi keskmist kiirust ühikulises elektriväljas. Elektrilise liikuvuse ühik SI-süsteemis on $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Praktikas kasutatakse meetrite asemel sentimeetreid [5].

Aeroioone liigitatakse nende liikuvuse järgi kolme rühma, mis on põhjendatud korrelatsiooniga grupi siseselt (tugevalt positiivne) ja kahe grupi vahel (puudub või negatiivne) [5]:

1. Kerged õhuioonid ehk klasterioonid, mis on väiksemad kui 1,6 nm (liikuvus suurem kui $0,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$);
2. Keskmised õhuioonid (kergete ja raskete õhuioonide liikuvusspektri vahel);
3. Rasked õhuioonid ehk aerosoolsed ioonid, mille läbimõõt on suurem kui 7,5 nm (liikuvus väiksem kui $0,03 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) [5,6].

Ioonide suuruse-liikuvuse vahelist sõltuvust kirjeldab Millikani valem 1.

$$z_{\text{Millikan}} = e_c \frac{1 + \frac{l}{r} \left[a + b \exp\left(-c \frac{r}{l}\right) \right]}{6\pi\eta r} \quad (1)$$

a , b ja c - empiirilised konstandid;

l – osakese keskmine vaba tee pikkus;

η – õhu viskoossus;

r – iooni suurus [4].

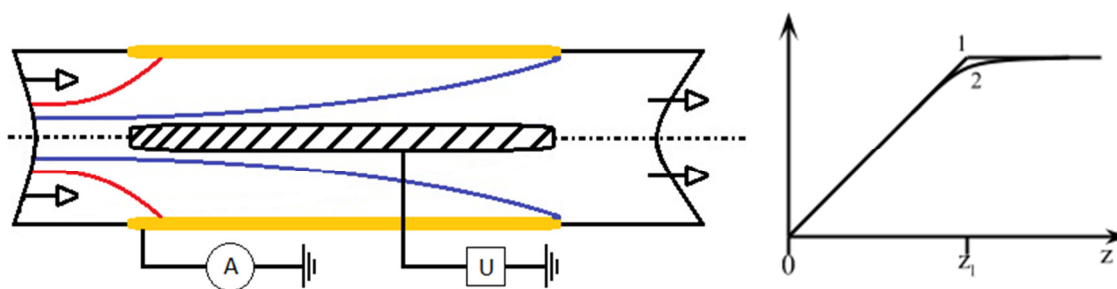
Aeroioone uuritakse integraalsete iooniloenduritega, mis mõõdavad ioonide kogukontsentratsiooni või täpsemalt, liikuvusspektrometritega, mis eristavad ioone elektrilise liikuvuse järgi ja mõõdavad nende liikuvusjaotust [7]. Antud töös kasutatav Gerdien iooniloendi on mõeldud just klasterioonide kontsentratsiooni mõõtmiseks.

3.3 Iooniloendur

Iooniloendiks kutsutakse seadet, mis loendab õhus leiduvaid ioone. Vastavat meetodit nimetatakse aspiratsiooni- ehk läbivoolumeetodiks [5].

Iooniloenduri tööpõhimõte seisab selles oleva mõõtekondensaatori ehk kollektori elektrivoolu mõõtmises, mis on põhjustatud aeroioonide sattumisest kondensaatori pinnale. Aeroioonid satuvad kollektori pinnale seetõttu, et kondensaatori plaatidele rakendatakse pinge, mis tekitab kahe plaadi ehk elektroodi vahele elektrivälja. Seadmesse tõmmatakse uuritavad ioonid, millele mõjub kondensaatoris olev elektriväli. Sõltuvalt aeroioonide liikuvusest, sadestub mingi osa neist mõõtekondensaatorile põhjustades mõõdetava voolu. Olenevalt iooniloenduri tüübist võib sellel olla mitu kollektorit, eelkondensaator ja/või puhverõhk. Puhverõhuks nimetatakse puhast õhku, mis ei sisalda ioone. Ideaalseimad iooniloendurid on teist järku diferentsiaalioendurid, mis kasutavad nii puhverõhku kui ka jagatud kollektorit. Erinevat tüüpi loendureid iseloomustavad erinevad ülekandefunktsioonid. Ülekandefunktsioon näitab, kui suur on tõenäosus, et aeroioon satub kollektori pinnale sõltuvalt tema liikuvusest [8].

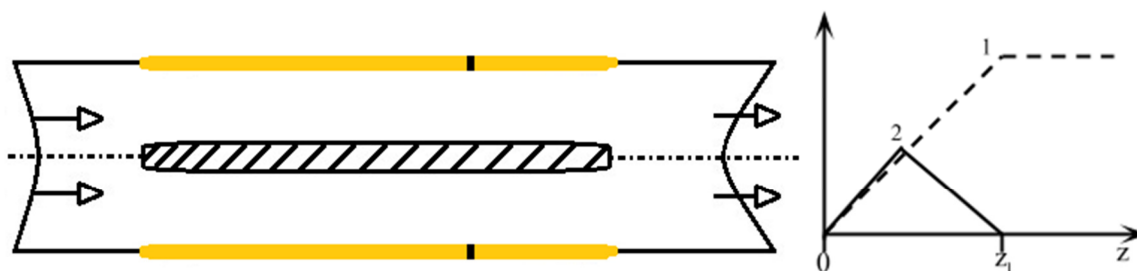
Integraalne loendur (joonis 2) on kõige lihtsama põhimõttega loendur, mis mõõdab ioonide kogukontsentratsiooni.



Joonis 2. Integraalse loenduri põhimõtteskeem ja ülekandefunktsioon. Kollane osa tähistab kollektorit. Punase joonega on tähistatud suurema liikuvusega aeroioonid ja sinine joon tähistab ioone piirliikuvusega z_1 [8].

Graafikul tähistab joon 1 ideaalse loenduri ülekandefunktsiooni ja joon 2 reaalse loenduri oma, mis on mõjutatud näiteks difusioonist [8]. Alates piirliikuvusest z_1 sadestuvad kõik kiiremad ioonid kollektorile eeldusel, et sisendmahtuvust ei ole.

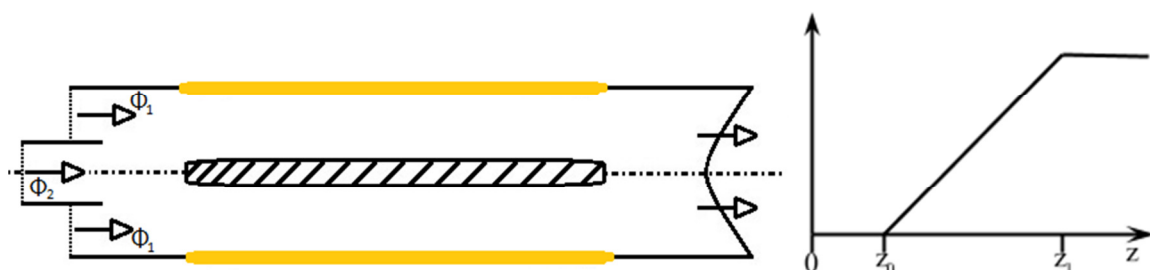
Loendur, mille kollektor on jagatud kaheks või enamaks osaks nimetatakse esimest järku diferentsiaallooduriks (joonis 3).



Joonis 3. Jagatud kollektoriga esimest järku diferentsiaalloodur ja selle ülekandefunktsioon [8]. Kollane tähistab kollektorit, mis on jaotatud kaheks isoleeritud osaks.

Graafikul tähistab joon 2 tagumise kollektori ülekandefunktsiooni ja katkendlik joon 1 eesmise elektroodi ülekandefunktsiooni [8].

Loendurit, mille sisendõhk on jaotatud kahte ossa, mõõdetavaks- ja puhverõhuks, nimetatakse samuti esimest järku diferentsiaallooduriks (joonis 4).



Joonis 4. Puhverõhuga esimest järku diferentsiaalloodur ja ülekandefunktsioon. Kollane tähistab kollektorit [8].

Ioonide liikumist mõõtekondensaatoris määrab õhuvoolu ja elektrivälja jaotus. Mõõtekondensaatori osasid saab iseloomustada piirliikuvusega. Piirliikuvuseks nimetatakse liikuvust, millest alates sadenevad kõik ioonid kollektori pinnale (joonistel 2-4 tähistatud z_1 -ga). Saab näidata, et silindersümmeetrilise analüsaatori puhul on ionide liikuvus määratud katete vahelise mahtuvuse, pinge ja õhu ruumkiiruse suhtega läbi valemi 2.

$$z = \frac{\phi \varepsilon_0}{C U} \quad (2)$$

Φ - õhuvoolu kiirust läbi kondensaatori;

C - analüsaatori mahtuvus;

U – analüsaatori katete vaheline pinge [9].

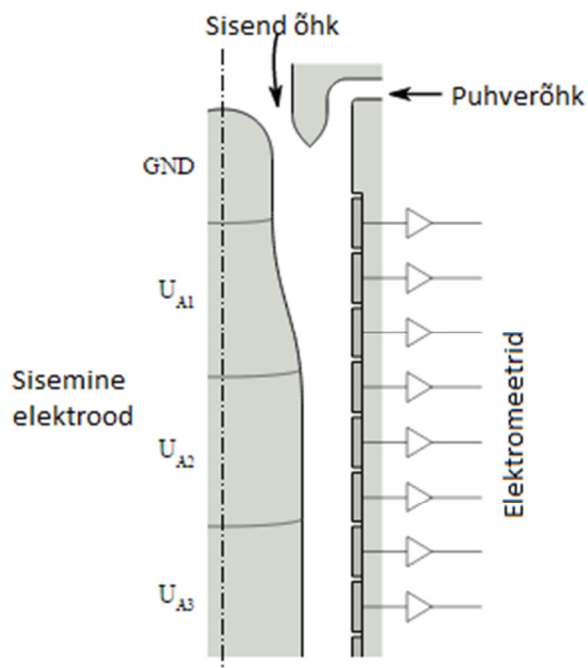
Kui seadmel on mitu kollektorit ja puhverõhk (joonis 5), siis sellisel juhul iseloomustab osakese liikuvust valem 3.

$$z_n = \frac{(\phi_a + \phi_s)\varepsilon_0}{\sum_{i=0}^n C_i U_i} \quad (3)$$

z_n - väikseima liikuvusega osakesed, mis jõuavad seadme ossa n ;

Φ_a - seadmes mõõdetav õhuvoolu kiirus;

Φ_s - elektriliselt neutraalse õhu ehk nn puhverõhu voolukiirus [9].

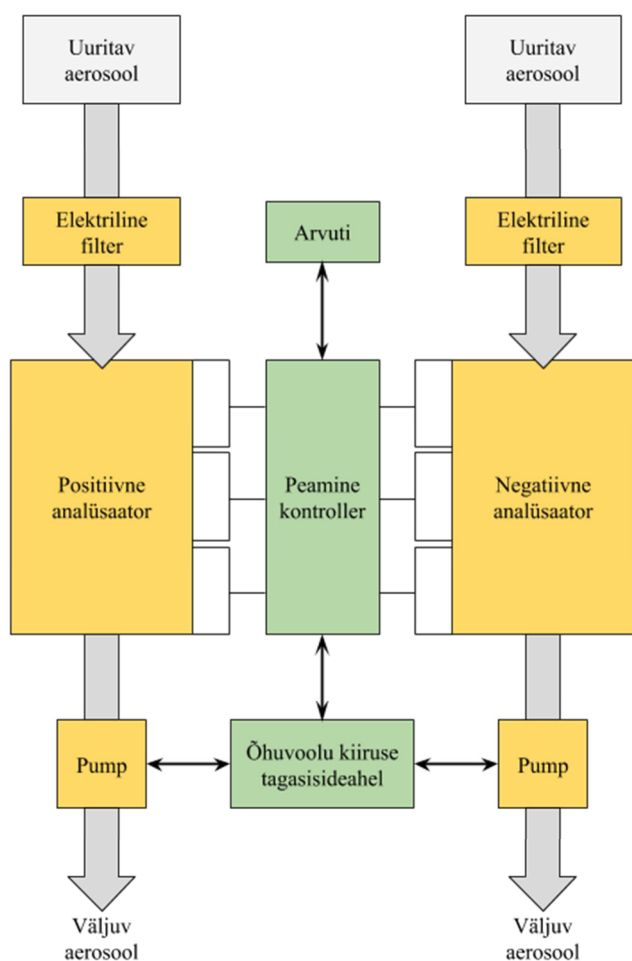


Joonis 5. Lihtsustatud silindersümmeetrilise iooniloenduri ristlõike skeem [9].

4 Gerdien iooniloendi

4.1 Tööpõhimõte

Gerdien loendi on silindersümmeetriline esimest järku diferentsiaalne iooniloendi, mille tööpõhimõte seisneb õhus leiduvate ionide laengu integraalsel mõõtmisel aspiratsiooni-meetodil. Uuritud loendi koosneb kahest identsest ja iseseisvast kanalist – üks positiivsete laengute ja teine negatiivsete laengute jaoks (joonis 6).



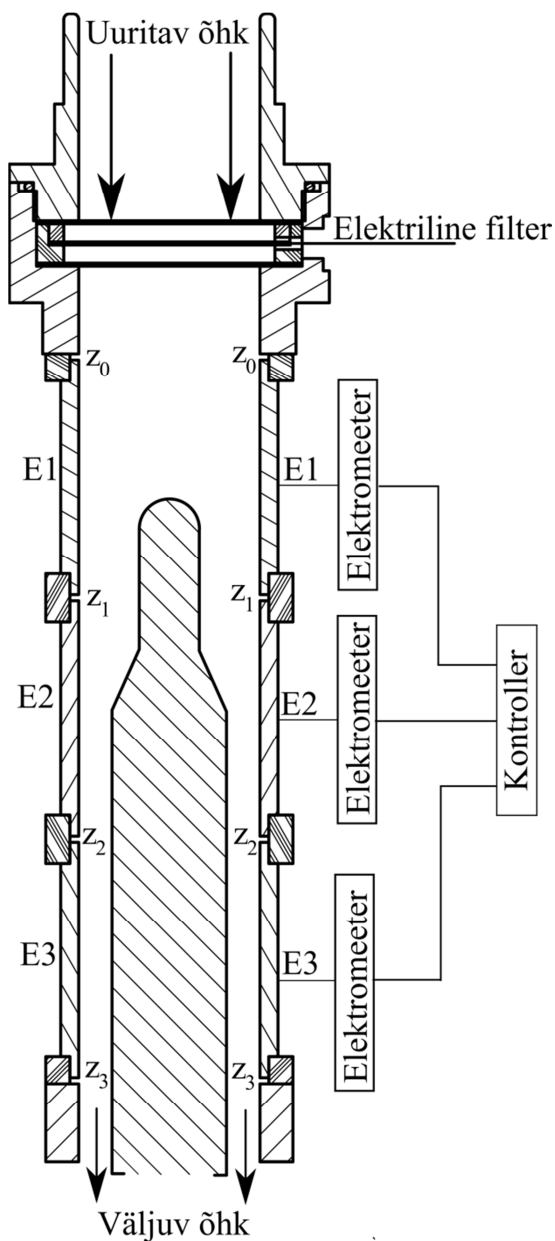
Joonis 6. Gerdien loendi skeem.

4.2 Elektriline sisendfilter

Kõige esimesena läbib uuritav õhk tarkvaraliselt juhitava elektrilise filtri, mis koosneb kolmest lähestikku paigutatud võrgust. Sisendfiltri (edaspidi ka sisend) eesmärk on eemaldada õhust mõõdetavad ionid, et hinnata seadme nullnivood ja mürataset. Filtreerimisrežiimis rakendatakse keskmisele võrgule pinge suurusjärgus 100 V. Kui võrk ei ole pingestatud läbib valdav osa ioone võrgud takistusega. Mingi osa ionidest sadeneb siiski võrgule difusiooni tõttu.

4.3 Analüsaator

Gerdien loendi analüsaator koosneb kolmest omavahel isoleeritud väliselektroodist ja keskmisest silindrist (edaspidi sisekate). Mõõtmise hetkel on keskmine silinder pingestatud positiivselt, kui uuritakse positiivse laenguga aeroioone ja negatiivselt, kui uuritakse negatiivse laenguga ioone. Väliselektroodid on maa potentsiaaliga. Keskmise silindri poolt tekitatud elektriväli tõukab laenguga aerosooliosakesed elektrodidele, kus elektromeeter mõõdab voolu.



Joonis 7. Gerdien loendi ühe kanali skeem. Ülevalt siseneb uuritav aerosool ja nendes olevad ioonid liiguvad elektrodide E1-E3 olenevalt nende liikuvusest.

Elektromeetri tööpõhimõte seisneb aktiivse tagasisidega integreeriva operatsiooni-võimendiga ahelal. Analüsaatori mõõteelektroodile sattunud elektrivool koguneb elektro-meetris täppiskondensaatorile. Kondensaatori pinget mõõdetakse perioodiliselt 24-bitise analoog-digitaal muunduriga. Kahel ajahetkel mõõdetud pinge väärtusega arvutatakse valemi 4 abil kattele kogunenud voolu suurus.

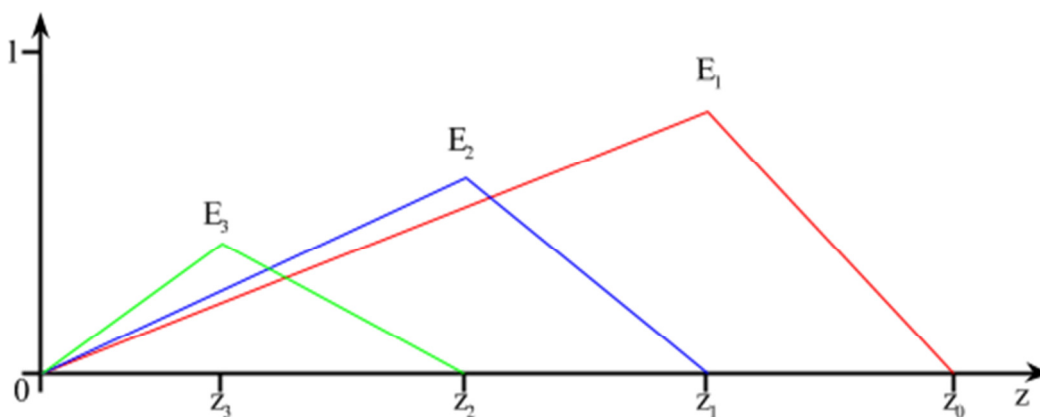
$$I = C \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (4)$$

ΔU – kondensaatori pingete vahe;

Δt – ajavahemik, mille vältel mõõdeti pingete väärtused;

C – kondensaatori mahtuvus.

Olenevalt ionide suurusest ja liikuvusest satuvad nad erinevatele elektrodidele. Käesolevas töös valiti seadme sisekattepinge ja õhuvoolukiirus nii, et katete piirliikuvused oleks: $z_0=250 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $z_1=2,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $z_2=0,5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, $z_3=0,25 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. See tähendab, et elektrodile E1 satuvad ionid alates liikuvusest z_0 ja elektrodile E2 z_1 jne. Ioonid suurema liikuvusega kui z_0 sadestuvad enne esimese elektrodini jõudmist ja neid ei mõõdetata. Aeglasemad ionid, kui z_3 võivad sadestuda kõigile elektrodidele (joonis 8).



Joonis 8. Uuritava iooniloendi ülekandefunktsioon.

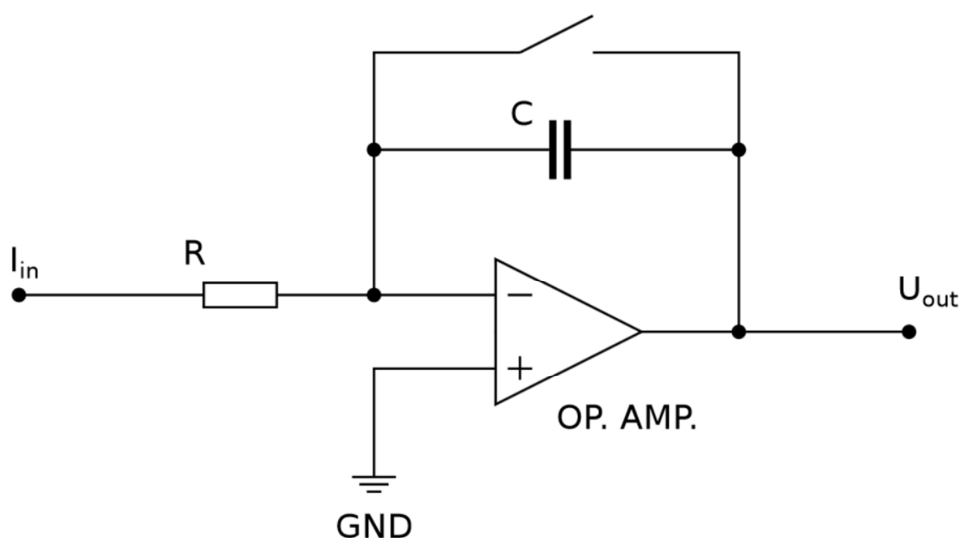
Suurem osa ionidest mõõdetakse keskmise elektroodi peal, sest klasterioonide suhteline kontsentratsioon on kõige kõrgem vahemikus z_1 ja z_2 [10].

Uuritud loendi sisekattepinget ja õhuvoolu kiirust on võimalik tarkvaraliselt muuta. Seega on näiteks võimalik vastavalt eksperimendi vajadusele valida sobilik õhuvoolukiirus ja samas sisekattepinget proportsionaalselt muutes säilitada soovitud piirliikuvused.

Vajadusel on võimalik ka piirliikuvusi muuta. Kõigi nelja piirliikuvuse väärtuste suhe on määratud seadme geometriaga ja jääb seetõttu konstantseks.

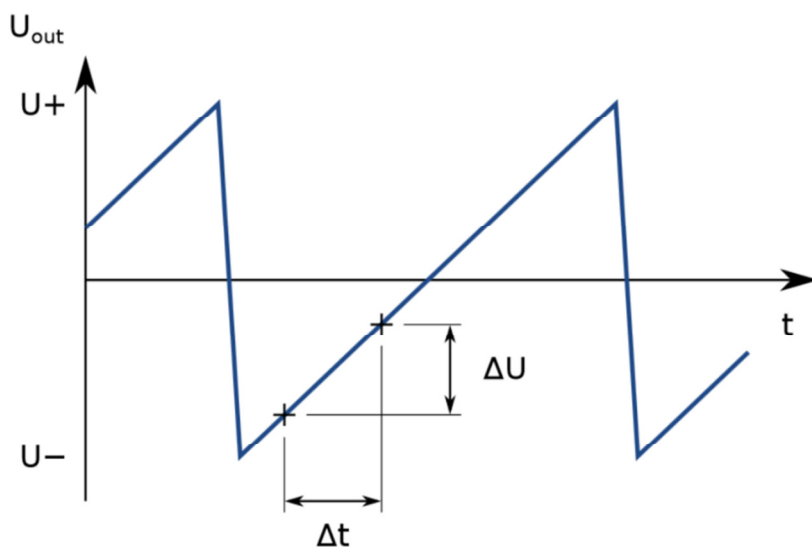
4.4 Voolu mõõtmine

Voolu mõõdab aktiivse tagasisidega integreeriv operatsioonivõimendi (joonis 9). Analüsaatoris kasutusel olev integreeriv võimendi on sarnane sellele, mida kasutatakse mitmekanalilises neutraalsete klasterite ja õhuioonide spektromeetris NAIS (*Neutral Cluster and Air Ion Spectrometer*) [7,11].



Joonis 9. Integreeriva operatsioonivõimendi skeem [11].

Võimendi väljundist mõõdetakse pinge muutust ajas, mis on proportsionaalne elektrodile langenud elektrilaenguga läbi valemi 4.



Joonis 10. Integreeriva operatsioonivõimendi väljundpinge ajaline käik [11].

Joonis 10 näitab, kuidas muutub võimendi väljundpinge ajas. Graafikul kujutatud pinge tõusu ajal kogunevad laengud elektromeetri kondensaatorisse ja toimub pinge mõõtmine. Kiire langus vastab elektromeetri lähtestamisele, mille käigus integreeriv kondensaator lühistatakse ja puhastatakse sellele kogunenud laengutest. See toimub kui võimendi väljundpinge jõuab kas ülemise või alumise piirini. Lähtestamine toimub uuritud loenduril keskeltläbi iga 2-3 tunni möödudes. Lähtestamise järgselt elektromeetri signaal stabiliseerub umbes 10 sekundit, mille jooksul saadud mõõtmistulemusi ei saa kasutada [11].

Gerdien loendi mõõdab kahes režiimis: mõõte- ja nullrežiimis. Mõõterežiimis toimub ioonide mõõtmine analüsaatori poolt ja pingestatud on ainult sisekate. Nullrežiimis pingestatakse ka sisendfilter, et mõõta operatsioonivõimendi lekkevoolu ja hinnata müra-taset. Kui mõõdetud lekkevool on liiga suur, võib see tähendada, et mõõteseadmes on sinna mittekuuluv võõrkeha (näiteks mustus või vesi), mis tekitab suurt lekkevoolu. Teisalt võib seade olla ka füüsiliselt katki. Vastavad režiimid vahelduvad ja töötavad ettemääratud aegade kaupa.

Antud töös oli kasutusel kahe-minutiline mõõtmistsükkel: 30 sekundit nullrežiimis ja 90 sekundit mõõterežiimis. Ühes tsüklis kogutud nullrežiimi andmed lahutatakse mõõtmisrežiimis tehtud mõõtmistest, et saada müravabad mõõtmistulemused.

5 Mõõteefektiivsuse hindamine

5.1 Sissejuhatus

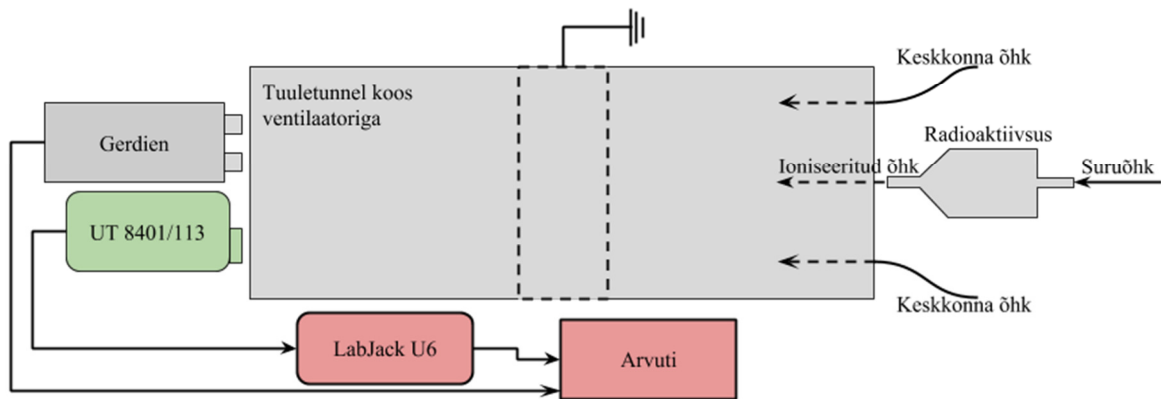
Uuritava seadme mõõteefektiivsus ehk suhtosa mõõdetavatest ionidest, mida aparaat detekteerib, on peaaegu täielikult määratud osakeste difusioonkadudega sisendis. Väike osa ioone sadenevad sisendis ka keskelektroodi põhjustatud elektrivälja tõttu, sest sisendosa mahtuvus selle suhtes pole päris null.

Kõik ionid, mis läbivad sisendi ja on vaadeldava mõõteelektroodi piirliikuvusest suurema liikuvusega, sadenevad antud elektrodile või sellele eelnevatele. Tänu integreerivatele elektromeetritele mõõdetakse kogu elektrodidele sadenenud ionide elektrivool. Seega mõõteefektiivsuse uurimisel on sisuliselt tegemist sisendkadude hindamisega.

Kadude hindamise eksperiment toimus kolmes osas. Esiteks mõõtis Gerdien loendi tavapärase seisendfiltriga kuid erinevate sisekattepingete ja õhuvoolu kiirustega, mida muudeti võrdeliselt. Niimoodi uuritava loendi parameetrite muutmisel peavad katetele sattunud ionide suhted jääma samaks, sest piirliikuvused sellisel juhul ei muutu. Sisendis esinevad difusioonikaod võivad aga õhuvoolumahtu kiirusest sõltuda. Järgmisena tõsteti ühe kanali sisendfilter teise ette, et õhk läbiks sisendit kaks korda. Sellisel juhul peaks seadme mõõteefektiivsus olema võrdne ühekordse sisendi mõõteefektiivsuse ruuduga. Samuti saab selle abil hinnata filtri kadusid ilma etalonmõõteriista kasutamata. Kolmandaks läks Gerdien loendi sisendfiltrite ette spetsiaalne „Y“ kujuline jagaja, mis jaotab ühest sisendist tulnud õhu kahe kanali vahel. Jagaja oli kasutusel Euroopa Tuumauuringute Keskuses (CERN), kus Gerdien loendi osales CLOUD-eksperimendis, mille eesmärk oli simuleerida kosmiliste kiirte mõju pilvekattete läbi uute aerosooliosakeste tekitamise või pilvede otsese mõjutamise teel [12]

5.2 Meetod

Kadusid hinnati võrdlusmeetodil. Gerdien loendiga mõõtis samal ajal Tartu Ülikooli keskkonnafüüsika instituudi aerosoolilaboris välja töötatud seade UT 8401/113. See seade on mõeldud õhu ionide arvkontsentratsiooni mõõtmiseks. Mõõdetavate ionide piirliikuvus seatakse sel masinal käsitsi ja selle töö tarbeks valiti $0,32 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, mis on suhteliselt lähedane Gerdien loendi viimasele liikuvusele z_3 . UT 8401/113 väljastab pinget, millega saab otseselt välja arvutada ionide kontsentratsiooni ruumalaühiku kohta [13]. Kalibratsiooni andmetest saab näha, et mõõtepiirkonnas kuni 3000 iooni/cm^3 vastab ühikulisele väljundpingele keskmiselt 1319 iooni kuupsentimeetri kohta.



Joonis 11. Seadmete paigutus mõõteefektiivsuse hindamise ajal. Joonisel paikneb Gerdien loendi. Joonis on pealtvaates.

Eksperimendi käigus mõõdeti arvutiga nii UT 8401/113, kui ka uuritava seadme andmeid korraga. UT 8401/113 seadme pinget mõõtis arvutiga ühendatud andmehõiveseadet LabJack U6. Hiljem võrreldi tulemuste ühe sekundi keskmist ja hinnati kadusid.

Gerdien loendi väljastab iga elektromeetri mõõteandmeid femtoamprites, mis on arvutatud valemiga 4. Saadud kolme elektromeetri andmed liideti ja sellest leiti ionide kontsentratsioon kuupsentimeetri kohta, kasutades valemit 5.

$$n(s) = \frac{I}{e_c \cdot \Phi} \quad (5)$$

Φ - õhuvoolu kiirus analüsaatoris (l/min)

I – Gerdien loenduri poolt väljastatud vool (fA)

Aeroioonide kontsentratsiooni tõstmiseks kasutati spetsiaalset silindrit, milles oli radioaktiivne plutoonium-239. Läbi selle silindri lasti suruõhku, mis ioniseeriti plutooniumi alfa kiirguse poolt. Ventilaatori abiga viidi ioniseeritud õhk mõõteriistadeni. Kuna ionide jaotus toru väljundis ei ole tingimata homogeenne, siis sooritati katseid mitme erineva mõõteseadmete paigutusega, et elimineerida võimalikud kõrvalekalded tulemustes asukoha tõttu.

5.3 Tulemused

Mõõtmised käesoleva töö tarbeks teostati Tartu Ülikooli keskkonnafüüsika aerosooli-laboris 12. märtsil 2015 joonisel 11 näidatud skeemi alusel.

	1			2			3		
	Vasakul	Paremal	Keskm.	Vasakul	Paremal	Keskm.	Vasakul	Paremal	Keskm.
+ kanal	79,0	87,2	83,1(40)	73,3	82,2	77,7(33)	72,8	63,8	68,3(38)
- kanal	77,1	81,4	79,2(46)	75,6	81,1	78,3(56)	65,6	58,3	62,2(38)
+ topelt	63,7	66,8	65,2(74)						
- topelt	61,4	57,9	59,6(39)						

Tabel 1. Gerdien loendi mõõteefektiivsus %-des. Ülalolevatele numbritele vastavad parameetrid (õhuvool, sisekattepinge): 1 – 30 l/min, 19,5 V; 2 – 20 l/min, 13 V; 3 – 10 l/min, 6,5 V. Sulgudes on toodud standardmääramatus.

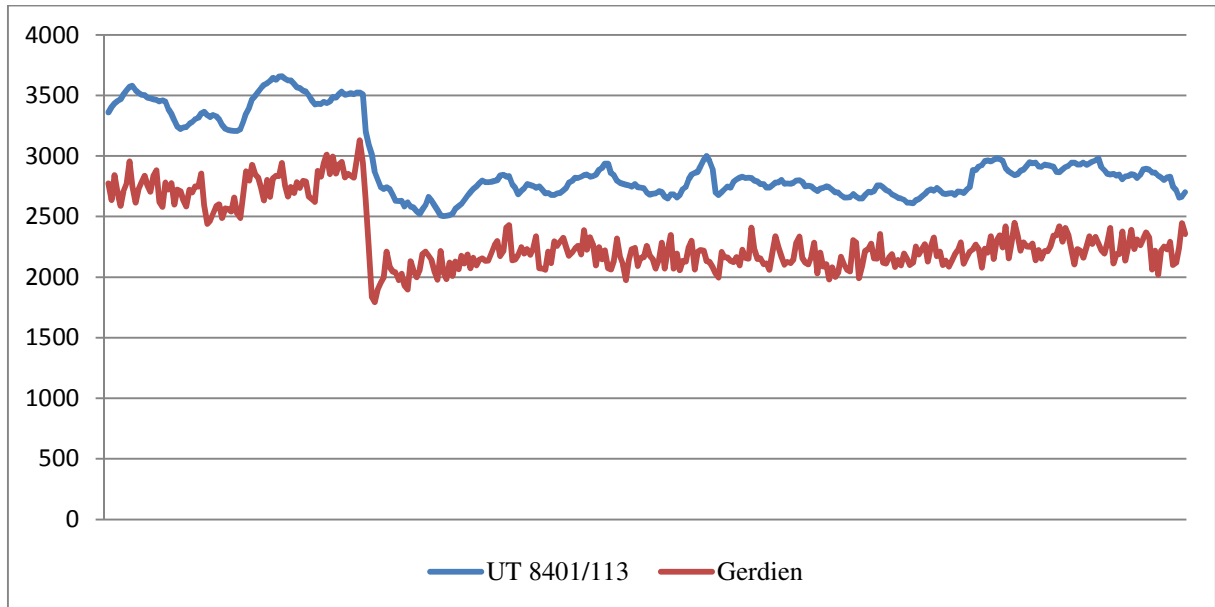
Tabelis 1 saadud tulemused näitavad Gerdien loendi mõõteefektiivsust võrreldes UT8401-ga. On näha, et efektiivsus on positiivse kanali korral üldiselt kõrgem. See on tingitud sellest, et positiivsete klasterioonide keskmine liikuvus on madalam ja nende kaod selle tõttu väiksemad. Tulemused on erinevate asetuste korral küll mõne protsendi võrra erinevad ja standardmääramatus võib tunduda suur aga tulemused on head kui arvestada eksperimendi keerulisust, mis seisneb näiteks seadmete asetuse ja väliste väljade mõjus. Lisaks on Gerdien loendi ajaline eraldusvõime tunduvalt suurem ja signaal muutlikum. UT8401/113 loendi signaal on seevastu tugevalt silutud (joonis 12).

Topelt sisendfiltri korral peab mõõteefektiivsus olema ühekordse asetuse ruut.

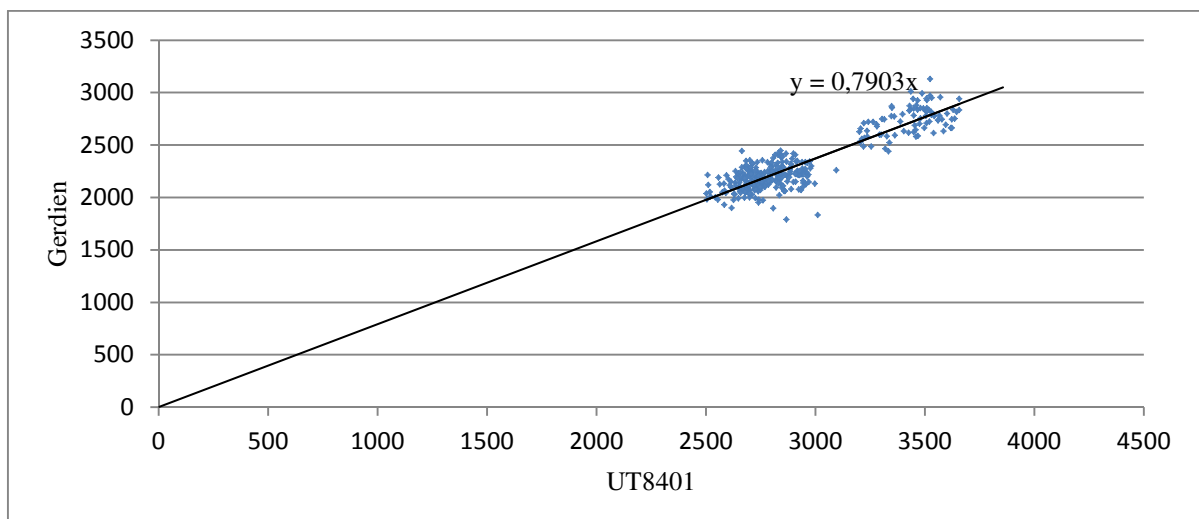
	Ühekordse asetuse ruut			Mõõdetud		
	Vasakul	Paremal	Keskmine	Vasakul	Paremal	Keskmine
Topelt sisend +	62,4	76,0	69,1(94)	63,7	66,8	65,2(74)
Topelt sisend -	59,4	66,3	62,7(103)	61,4	57,9	59,6(39)

Tabel 2. Gerdien loendi teoreetiline ja mõõdetud mõõteefektiivsus %-des topelt sisendi korral. Sulgudes on toodud standardmääramatus.

Tabelist 2 on näha, et kui uuritav loendi paiknes vasakul pool siis klappisid tulemused paremini võrreldes paremal paiknemisega. Keskmiseks tulemuseks topeltsisendiga tuli positiivse kanali poolel 65,2% ja negatiivse kanali poolel 59,6%. Jällegi tulemused on küll mõne protsendi võrra erinevad kuid head arvestades sellise eksperimendi olemust.



Joonis 12. Gerdien loendi ja UT8401 väljundsignaalidest arvatud kontsentratsioonid (ühikutes iooni/cm^3). Näidatud on positiivne kanal ühekordse sisendiga, õhuvooluga 30 l/min, sisekattepingega 19,5 V.



Joonis 13. Gerdien loendi ja UT8401 kontsentratsioonide hajuvusgraafik (ühikutes iooni/cm^3).

Joonistel 12 ja 13 on näha väljundsignaalide võrdlust. Joongraafikult on näha, et vanemal integraalsel loenduril on reaktsiooniaeg tunduvalt aeglasem kui moodsamal Gerdien loendil, mille ajaline lahutus on tunduvalt parem.

CLOUD-eksperimendis kasutatud sisendi katsetamise tulemused olid järgnevad:

	1	2	3
Positiivne kanal	52,4	55,6	50,6
Negatiivne kanal	41,8	45,2	38,6
Keskmine	46,6(24)	50,4(36)	44,6(28)

Tabel 3. Gerdien loendi mõõteefektiivsus %-des CERN-is kasutatud sisendiga. Ülalolevatele numbritele vastavad parameetrid (õhuvool, sisekattepinge): 1 – 10 l/min, 6,5 V; 2 – 6,5 l/min, 4,225 V; 3 – 5,5 l/min, 3,575 V.

Sellise seadistusega ei mõõdetud kahel korral, sest oli ainult üks sisend ja seda sai sättida tuuletunneli ette paremini kui kahe eraldiseisva sisendi korral. Tulemustest on näha, et selle sisendi kasutamisel suurenevad kaod tunduvalt, sest ioonidel on sisendit läbides palju suurem tõenäosus enne analüsaatorini jõudmist sadestuda sisendi seintele. Tulemus on kõige parem parameetrite 2 korral, sest siis on õhuvoolu kiirus kõige optimaalsem. Parameetrite 1 korral on õhuvoolu kiirus liiga suur, mis tekitab voolukanalis turbulentset voolamist. Parameetrite 3 korral on õhuvoolu kiirus liiga aeglane ja ioonid sadestuvad rohkem sisendi seintele.

6 Signaalitöötlus

6.1 Sissejuhatus

Igal mõõteseadmel tekib mõõtmisel viga ja esineb paratamatu mõõtemääramatus, mis uue seadme puhul vajab hindamist. Uuritava loendi puhul mõjutab viga ja mõõtemääramatust kõige rohkem eelmainitud elektromeetri ja analoog-digitaal muunduri viga, mis sõltub näiteks mõõtekeskkonna temperatuurist. Vaatamata sellele, et kasutatav elektromeeter ja muundi on sarnane sellele, mis on käigus NAIS-ides on neil mõned erinevused. Esiteks on Gerdien loendi elektromeetri elektroonikat täiustatud. Teiseks on NAIS-i ühe kanali keskmine mõõtesagedus 10-15 Hz [7] võrreldes uuritava loendi 25-30 Hz. Nende erinevuste tõttu vajas andmetöötluses signaalide digitaalne filtreerimine uuesti hindamist. Digitaalne filtreerimine toimub kaalufunktsiooni abiga ja selle eesmärk on keskmistamise efektiivsuse parandamine lühikeste perioodide puhul.

6.2 Meetod

Antud seadmes kasutatava kaalufunktsiooni töö põhimõte seisneb liikuvast keskmistamises, mis leitakse kasutades ristkorrelatsiooni (valem 6).

$$s_t = \sum_{n=0}^{N-1} w_n \cdot s_{t+n} \quad (6)$$

s_{t+n} – töötlemata andmed;

s_t – silutud andmed;

w_n – kaalufunktsioon;

N – akna laius.

Niimoodi töödeldakse signaal läbi kindla iseloomuga aknaga, mis saab oma väärtused kaalufunktsioonist. Liikuva keskmistamise käigus korreleeritakse uue tulemuse saamiseks eelnevaid ja/või järgnevaid mõõdetud punkte. Kaalufunktsiooni kasutamisel peab kehtima valem 7.

$$\sum w_n = 1 \quad (7)$$

Keskmistamise käigus andmejada lüheneb N liikme võrra konvolutsiooni omaduste tõttu. See tulemusi ei mõjuta, sest mõõdetud andmete hulk on suhteliselt suur võrreldes akna laiusega.

Käesolevas töös kasutati võimalikult erineva iseloomuga aknaid. Kõikides valemities tähistab N akna laiust ja need on normeeritud ühele.

Lihtne langev ja tõusev eksponent aken (valem 8).

$$w_n = C^n \quad (8)$$

Valemiga 8 kehtib lisatingimus 9.

$$0 < C < 1, \quad (9)$$

Langeva akna korral $n = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$. Tõusva akna korral $n = N - 1, \dots, 3, 2, 1, 0$. Praktelistel kaalutlustel kasutati töös $C=0,9$.

Järgnevad aknad on sümmetrilised N keskpunkti suhtes ja n -i muutumise suund ei mängi rolli.

Poissoni aken (valem 10).

$$w_n = \exp\left(-\left|n - \frac{N-1}{2}\right|\frac{1}{\tau}\right) \quad (10)$$

$\tau = \frac{N}{2} \frac{8.69}{D}$ - D iseloomustab Poissoni akna eksponentsiaalsust. Töös kasutatud $D=8,69$

Hammingu ja Hanni aken (valem 11).

$$w_n = \alpha - \beta * \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (11)$$

Hammingu akna puhul $\alpha = 0.54, \beta = 1 - \alpha = 0.46$

Hanni akna puhul $\alpha = \beta = 0.5$

Koosinus(siinus) aken (valem 12).

$$w_n = \sin\left(\frac{\pi n}{N-1}\right) \quad (12)$$

Kolmnurkne aken (valem 13).

$$w_n = 1 - \left| \frac{n - \frac{N-1}{2}}{\frac{N}{2}} \right| \quad (13)$$

6.3 Tulemused

1,6437	20	16	12	8
Tõusev eksponent	1,4867	1,4967	1,5120	1,5251
Poisson	1,4893	1,5044	1,5254	1,5424
Langev eksponent	1,4936	1,5006	1,5239	1,5366
Koosinus	1,5043	1,5231	1,5437	1,5704
Kolmnurk	1,5044	1,5213	1,5404	1,5607
Hamming	1,5068	1,5253	1,5451	1,5707
Hann	1,5137	1,5332	1,5529	1,5820

Tabel 4. Standardmääramatused erinevate akende puhul (fA). Üleval on akna laius N ja vasakul kaalufunktsioon. Üleval vasakus nurgas on töötlemata signaali standardmääramatus. Kasutatud on positiivse analüsaatori esimest elektroodi.

Tabelist 4 on näha, et parimaks kaalufunktsiooniks on Gerdien loendile tõusev eksponentsiaalne aken olenemata akna pikkusest. See tulemus klapi NAIS-i peal tehtud katsetega, kus leiti samuti, et parim kaalufunktsioon filtreerimaks signaali on eksponentsiaalne aken [4].

7 Kokkuvõte

Töö referatiivses osas kirjeldati aeroioone ja nende mõõteseadmeid. Pikemalt tutvustati antud töös uuritud Gerdien tüüpiiooniloenduri ehitust ja tööpõhimõtet. Eksperimentaalses osas hinnati uuritava loendi kadusid võrdlusmeetodil ja analüüsi, kas NAIS-ides kasutuselolev signaalitöötluse digitaalne filter sobib ka Gerdieniooniloendis olevale uuendatud elektroonikale.

Eksperimenditulemustest selgus, et uuritava loendi mõõteefektiivsus on 70-80%, mida võib lugeda suhteliselt heaks, kui arvestada klasterioonide suurt mõjutatavust ja eksperimendi keerulisust. Topelt sisendfiltri korral langes keskmine mõõteefektiivsus 55-65%-le, mis langeb hästi kokku ühekordse sisendfiltri mõõteefektiivsuse ruuduga. CERN-is CLOUD-eksperimendis kasutatud sisendi korral vähenes mõõteefektiivsus 40-50%-ni, mis oli oodatav arvestades jagaja kuju ja ionide suuremat võimalust sadestuda sisendi seintele.

Signaalitöötluse käigus töödeldud andmete abiga tehti kindlaks, et kõige paremaks digitaalseks filtriiks, vähendamaks täiustatud elektromeetri ja analoog-digitaalmuundi müra on eksponentsiaalne aken. See on kooskõlas NAIS-idel kasutatava filtriga.

Kokkuvõttes saab öelda, et tulemused on ootuspärased ja usaldusväärsed.

8 Tänuavaldused

Töö autor tänab juhendajat Sander Mirmet, kelle abi ja nõuannetega sai see töö võimalikuks. AS Airelit, kes ehitas uuritud seadme. Jorma Veiderpassi, ilma kellela oleks kogu teekond olnud tunduvalt raskem ja Reili Saart, kes oli alati toeks, kui vaja.

9 Kasutatud kirjandus

1. E. Tamm, „Aerosoolifüüsika“, (2008)
http://meteo.physic.ut.ee/kkfi/index_files/eduard_tamm/AEROSOLIFYYSIKA_internetis_2008.pdf , 24.05.2015.
2. M. Palo, „Elektrituulest aerosooli elektrilise spektromeetri mõõtekondensaatoris“, Magistriöö, Tartu Ülikool, 2014, lk 4-8
3. E. Tamm, M. Vana, „Nukleatsioonipuhangute eksperimentaalne uurimine“ (2008)
http://meteo.physic.ut.ee/kkfi/index_files/teadustoo/aerosool/nukleatsioonipuhangud/nukleatsioonipuhangud.html (24.05.2015).
Pilt on pärit lehekülje siseselt viitelt:
http://meteo.physic.ut.ee/kkfi/index_files/teadustoo/aerosool/nukleatsioon/Ioon-nukleatsioon_n2.gif
4. S. Mirme, „*Development of Nanometer Aerosol Measurement Technology*“. Doktoritöö, Tartu Ülikool, 2011, lk 18.
5. „Teaduspreemia täppisteaduste alal uurimise tsükli „Atmosfääri aerosooli ja aeroioonide tekkeprotsesside ja evolutsiooni uurimine, aeroioonide liikuvusspektromeetria meetodite ja aparatuuri arendamine“ eest“ kogumikus *Eesti vabariigi teaduspreemiad 2010*, R. Villems, H. Help, S. Jakobson, Ü. Rebo, G. Varlamova (Eesti Teaduste Akadeemia, Tallinn, 2010), lk. 52-66.
6. K. Aljas, „Liikuvusspektromeetria: Meetod jäätmegaaside määramiseks“. Bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, 2008, lk. 3-4, 8.
7. S. Mirme, „*NAIS Overview*,“ (2015) <http://wiki.aiREL.ee/Docs/NaisOverview>, 24.05.2015.
8. H.F. Tammet, „*The Aspiration Method for the Determination of Atmospheric-Ion Spectra*,“ (Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1970), I peatükk.
9. S. Mirme, „*Mobility analysis*,“ (2011) <http://wiki.aiREL.ee/Docs/MobilityAnalysis>, 24.05.2015.

10. U. Hõrrak, „*Air Ion Mobility Spectrum at a Rural Area*“. Doktoritöö, Tartu Ülikool, 2001 lk 21.

11. S. Mirme, „*Neutral cluster and Air Ion Spectrometer NAIS Operation and Service Manual*,“ (2015) lk. 13-15.

Kättesaadav:

<http://wiki.airel.ee/Docs/NaisManual?action=AttachFile&do=get&target=nais-manual-20150415.pdf> (25.05.2015) .

12. CERN – Cloud Experiment, <http://home.web.cern.ch/about/experiments/cloud> (25.05.2015).

13. A. Mirme, E. Tamm, H. Tammet, „Aerosoolimõõtmise tehnoloogia arendamine TÜ keskkonnafüüsika instituudis,“ (2008).

http://meteo.physic.ut.ee/kkfi/index_files/teadustoo/aerosoolimootmise_tehnoloogia/aerosoolimootmise_tehnoloogia.html (24.05.2015).

10 Study of Gerdien type ion counter

Paap Koemets

Summary

The theoretical part of this thesis gives an overview of aerosol ions and the principles of their measurement devices. More detailed overview is given of the principles and design of a new Gerdien type ion counter. In the experimental part a study was conducted to assess detection efficiency of the new instrument. Also an analysis was carried out to optimize the digital signal filter used in the data processing of the instrument.

From the experimental results it was concluded that the detection efficiency is about 70-80%. This result is considered to be good because cluster ions are very easily influenced by external electric fields. Also the nature of this experiment is complex. Additionally an inlet for the ion counter was also tested that was used in the CLOUD-experiment in CERN. Results suggested that inlet decreased the average detection efficiency to 40-50%. This was an expected result considering the narrow diameter and shape of the inlet.

Data processing gave a conclusion that the best digital filter to whiten the noise from electrometer and analog-digital converter is an exponential window that is previously used by NAIS.

In the conclusion one can say that the results match the expectations and can be considered trustworthy.

11 Lihtlitsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Paap Koemets (sünd. 01.06.1992)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsents) enda loodud teose

„GERDIEN TÜÜPI IOONILOENDURI UURIMINE“

mille juhendaja on Sander Mirme

- 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 28.05.2015